環境風洞におけるビデオ画像計測手法の開発研究

その3 画像濃度減衰法による通風模型の換気回数の測定方法について

STUDIES ON INSTRUMENTATION TECHNOLOGY OF VIDEO IMAGE
IN WIND TUNNEL FOR ENVIRONMENTAL RESEARCHESPart 3 Measurement of air change rates in a cross-ventilation model
using the step down method

大場正昭*, 入江謙治**

Masaaki OHBA and Kenji IRIE

Air change rates in a cross-ventilation model were measured from the decay curves of video image signals obtained by the step down method assuming perfect mixing of tracer mists inside the spaces. From the wind tunnel experiments, the following conclusions were drawn. 1) Good correlation between image signals and luminous reflectances of achromatic color chips was achieved by correctly adjusting the pedestal level of the video camera. 2) The ray extinction due to lighting scattering did not affect the measurement accuracy of the air change rates in the two-dimensional model. 3) The tracer mists in a diameter between $0.25\ \mu\text{m}$ and $2.0\ \mu\text{m}$ could obtain the same measurement accuracy. 4) For oil mists as tracer, laser powers with more than 0.5 watt were enough to visualize the flow patterns in the model. 5) The air change rates were proportional to the reference velocities. 6) Compared to the air change rates obtained by the tracer gas procedure using a high-speed hydrocarbon analyzer, the proposed method could prove the capability of measuring those with an error of less than 9 % in the range between 0.25 m/s and 2.5 m/s of reference velocities.

Key words: Video image, Air change rate, Step down method, Wind tunnel

ビデオ画像、換気回数、減衰法、風洞

1. 序

室内の空気環境を快適に維持するためには、種々の原因により汚染された空気を稀釈、排出する必要がある。そのために必要な空気量は必要換気量と呼ばれ、建物用途ごとに定められている。建物の換気設計で算定される必要換気量が、実際、どのくらい確保されているかは、室内の空気環境を評価する上で大切な指標であり、換気量を現場で測定する要求度はとても高い。

現在、室内換気量を測定する方法としてJISA1406の屋内換気量測定法(炭酸ガス法)が推奨されている¹⁾。測定法はガス濃度増加法と減衰法からなり、このうちのガス濃度減衰法は、炭酸ガスを室内に放出して定常濃度に達してから放出を止め、炭酸ガス濃度の減衰過程から換気回数を計算して換気量を算出する方法である。室内での炭酸ガスの瞬時一様拡散と、壁面で吸着・脱着がないことを前提にしているので、室内に濃度分布差があるときに平均換気回数を求める場合は、居住域を空間分割し、垂直方向と水平方向に測定点を十分に多くして、その算術平均値を用いなければならない。さらに、少なくとも最低5回以上繰り返して測定し、その平均値を取る必要がある。従って、現行の測定法はかなりの

時間と労力を必要とするので、簡便な測定方法の開発が望まれる。

最近の著しい画像技術の進歩に伴い、工学の広い分野で画像処理技術が応用されている。汎用のビデオカメラの画素数は25万点以上で録画速度は30Hzである。室内空気の流れはあまり速くないことを考慮すると、可視化される煙の減衰過程を汎用のビデオカメラで充分追跡し撮影できる。今回、トレーサガス濃度の減衰過程からでなく、ビデオ画像信号値の減衰曲線から換気回数を測定する方法について、風洞模型実験により検討し、本測定法の有効性を明らかにしたので報告する²⁾⁻⁵⁾。

2. 濃度減衰法による換気回数の算定式⁶⁾

室内に侵入または室内で発生した汚染ガスは、瞬時一様拡散すると仮定して図-1で汚染ガスの質量収支をたてると

$$C = C_0 + (C_1 - C_0)e^{-(Q/V)t} + M/Q(1 - e^{-(Q/V)t}) \quad (1)$$

が得られる。 C_1 は時刻 $t = 0$ の室内濃度。上式でガス発生量がないとすると

$$C = C_0 + (C_1 - C_0)e^{-(Q/V)t} \quad (2)$$

となる。 C_0 を左辺に移項して、両辺の対数をとると

* 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博

** 東京工芸大学工学部建築学科 助手

Prof., Dep. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics,
Dr. Eng.
Research Assoc., Dep. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics

$$\log(C - C_0) = \log(C_1 - C_0) - Q/V \cdot t \quad (3)$$

を得る。従って、瞬時一様拡散の仮定が成り立つ場合、室の換気回数 Q/V は濃度 $(C - C_0)$ と時間 t の関係を片対数表示して、直線勾配の傾き Q/V から算出される。

3. 風洞実験の概要

(1) 画像計測システム^{7,8)}

①画像撮影システム 図-2に示す風洞床面に室内通風模型を設置した。照明用のレーザはNEC-GLG3602アルゴンイオンレーザで、出力は6Wである。レーザ光の波長は458nm～515nm。照明はレーザ光を風洞上部のガルバノレンズにより幅約1.2mmの均一な照度分布のレーザシートを作成して、模型に照射した。撮影にはSONYのDXC-17型カメラを使用した。録画速度は30Hz。

②画像処理システム 分解能8ビットでモノクロ映像を連続的に768フレーム取り込むことができるライブラリー社の画像処理機ひまわり(メモリ512×512、ホストコンピュータGateway2000)により、映像信号を0.0～1.0の画像信号にデジタル変換した。サンプリング間隔は2Hz～30Hz。フレームの有効画素数は横512個、縦481個。

(2) 風洞 図-2に示す幅300mm、高さ500mm、長さ1800mmの吹き出し型風洞(Type1)を使用した。実験項目のうち、光の散乱減衰の検討は、風洞測定部を幅500mm、高さ500mm、長さ1400mmに改装した吹き出し型風洞(Type 2)を用いた。

(3) 室内通風模型 図-3に模型を示す。長さ200mm、幅290mm、高さ300mmの2次元模型で、風上側上部と風下側下部に高さ30mmのスロット型開口部を設けた。さらに風下側開口部に長さ50mmのダクトと開閉式の蓋を付けて、排出する煙の逆流を防いだ。風洞床面から高さ50mmまでは煙チャンバーボックスとし、煙の送入停止後にスライド式の蓋で煙チャンバーの孔を密閉した。模型の縮率の大きさから、流れは模型周辺で縮流を生じるが、撮影に適した明瞭な2次元流れパターンを得るために、この形状を選択した。

(4) 計測器 ガス濃度測定はテクニカの高速度炭化水素分析計THC-1Aを用いた。時定数はキャピラリーチューブ長さ600mmのとき48Hzを示す。

(5) 実験条件 風洞実験は一様流の下で画像測定とガス濃度測定を行った。表-1に実験条件を示す。可視化トレーサはプロピレングリコールを主成分とするスモーク液(ダイニチ工業)とオンジナオイルNo.15を用いた。スモーク液のミストは火災シミュレーションや舞台の演出効果を高めるための煙として用いられ、芳香臭である。ミストの室容積濃度比 C_r は0.15～0.83とした。室容積濃度比は模型下部に溜めたミスト体積を室容積で除して算出した。模型の軒高風速 U_0 は0.25m/s～2.5m/s、レーザ出力 E は0.25W～5W。画像実験は各5回行い、5回の画像信号値を積算平均した平均減衰分布から換気回数を算出した。前報^{7,8)}では画像信号の瞬間値と平均値を区別したが、本報では平均化処理した画像信号を扱うので、画像信号平均値を画像信号値と記述する。図-4に画像解析点を示す。カメラの空間分解能は約1mmであった。

ガス濃度測定は軒高風速を0.25m/s～2.5m/sで0.25m/s間隔に変化させて、各5回測定を行ない、5回のガス濃度減衰分布を積算平均した平均減衰分布から換気回数を算出した。測定点は画像解

図-1 室内の汚染ガス収支

図-2 画像撮影システム

図-3 通風模型

図-4 画像解析点

図-5 無彩色明度標準色票のマンセル明度指数と画像信号値の関係

表-1 風洞実験の実験条件

測定項目	レーザ光源 $E(\text{Watt})$	軒高風速 $U_0(\text{m/s})$	室容積濃度比 C_r	風洞のタイプ
画像測定	光の散乱減衰	4.0	0.17～0.83	TYPE 2
	レーザ光強度	0.25～5.0	0.15	TYPE 1
	ミスト粒径	4.0	0.25～2.5	TYPE 1
ガス濃度測定	軒高風速	4.0	0.15	TYPE 1
	軒高風速	—	0.25～2.5	TYPE 1

析点No.1と同じ点にした。

(6) 測定方法 ①画像測定 トレーサ液の加熱により発生するトレーサミストを、流出口を蓋で閉ざした模型内に入れた。トレーサミストを一定量溜めた後、煙チャンバーの蓋を閉めて流出口の蓋を開放してから、トレーサミストの減衰過程を撮影した。

②ガス濃度測定 エチレンガスと空気の混合ガスを模型内に排出し、定常濃度に達した後、排出を止め、高速度炭化水素分析計で測定した。何れの風速においても定常濃度が0.5~1%になるようにエチレンガスと空気の混合比を調整した。

4. 実験結果及び考察

4.1 無彩色明度標準色票によるビデオカメラの光電変換特性に関する検討

風洞実験に先立ち、カメラスタンドの作業面に色票を置いて45度から白色光の照明を当て、真上0.7mに取り付けたビデオカメラで撮影して、カメラの光電変換特性を調べた。対象物の明るさとイメージセンサの受光面にできる像の明るさとの間には

$$J = J_0 \cdot R \cdot T / \{4(m+1)^2 F^2\} \quad (4)$$

ここで J : 像面照度、 J_0 : 対象面照度、 R : 対象物の反射率

T : レンズの透過率、 m : レンズの倍率、 F : レンズの絞り
が成り立ち、像面照度は対象物の反射率と照度に比例する⁹⁾。像面照度はイメージセンサの光電変換により電気信号である画像信号に変換される^{9,10)}。

$$I = k \cdot J^\gamma \quad (5)$$

ここで、 k : 光電変換係数、 γ : ガンマ係数

従って、画像信号は反射率と対象面照度のべき乗に比例する。図-5に色票のマンスル明度指数と画像信号の関係を、図-6に色票の視感反射率と画像信号の関係を示す。対象面照度は450lx。レンズ絞り2.8mm、レンズ20mm。撮影は色票の上に無反射ガラスを置いて行った。カメラの感度調整が不十分であると、暗電流の影響¹⁰⁾で図-5の白丸に示すように、高い照度で色票が照明されたときに低明度番号域の線形性が低下する。カメラのペDESTALを調整して色票の視感反射率が零のときに画像信号が零になるようにした¹¹⁾。図の黒丸で示す。ペDESTAL調整によりゲインはやや増加したが、全体的に良い線形性を得ることができた。固体撮影デバイスは一般に $\gamma = 1$ であるが¹⁰⁾、図-6では $I \sim R^{0.735}$ の関係が成立した。

風洞実験はカメラの良い光電変換特性の下でトレーサミストの光散乱減衰過程を撮影するように努めた。

4.2 トレーサミスト中のレーザ光の散乱減衰に関する検討

前報^{7),8)}までは、単独煙突近傍の排煙拡散現象を撮影対象にしたので、排煙拡散領域は狭く、レーザ光源出力が十分大きくて光エネルギー密度を十分大きくとれたことから、懸濁粒子によるレーザ光の散乱減衰は小さかった¹²⁾。しかし、閉鎖的空間の場合、トレーサミストの懸濁粒子が模型内に充満するので、光の散乱に基づく画像信号の減衰が大きいと懸念される。そのため、レーザ光の散乱減衰の影響を検討した。

(1) レーザシート光の散乱減衰

模型内に一様なミスト分布を生成するために、トレーサミスト

図-6 無彩色明度標準色票の視感反射率と画像信号値の関係

(1) シート光 (2) ビーム光
図-7 レーザ光で照射された模型内の画像信号分布

図-8 レーザシート光での散乱減衰分布

図-9 レーザビーム光での散乱減衰分布

図-10 画像信号の減衰分布

を一定量溜めてから流出口を開けてミストを排出した。ミストの排出が開始されてから同じ画像信号値レベルが一定時間持続する場合に模型内のミスト分布は一様状態に達していると判断した。図-7(1)に模型内の画像信号値のコンター分布を示す。画像のサンプリング周波数30Hz、平均化時間1.0秒。レーザ光は4W、室容積濃度比は0.5、軒高風速は0.5m/s。流入口の高さレベルは、風の流入によりトレーサミストが流入空気と十分混合しなかったため、流入口高さより低い領域で光の散乱減衰を調べた。撮影は5回行い、積算平均して画像信号分布を求めた。図-8に片対数表示した画像信号分布を示す。解析点は $X=100\text{mm}$ の模型中心軸上。光路長 L の始点は $Z=236\text{mm}$ とした。大きな光エネルギー密度が得られた $0\text{mm} \leq L \leq 100\text{mm}$ の領域では、画像信号が飽和して懸濁粒子による光の光路減衰の影響は小さかった。 $L > 100\text{mm}$ で散乱減衰の影響が現れ、レーザ光は懸濁粒子に吸収、透過、反射しながら減衰した。コロイド粒子内の光散乱はランバート・ベールの法則¹³⁾

$$i_r = i_0 \cdot D \cdot \exp(-\tau L) \quad (6)$$

ここで、 i_r : 透過光強度、 i_0 : 入射光強度、 τ : 濁度

D : 多重散乱による再生因子、 L : 光路長

に従う。本実験ではレーザ光の透過光が散乱してカメラレンズに入射すると考え、画像信号の減衰分布から濁度と多重散乱の再生因子を算出した。単位長さ当たりの散乱光量を示す濁度は0.0025[1/m]、多重散乱の再生因子は0.773であった。

(2) レーザビーム光の散乱減衰

レーザシート光の多重散乱効果を比較評価するためにビーム光の散乱減衰を検討した。直径約1.2mmのビーム光を作成して模型中心軸上を照射した。実験条件はシート光と同じである。図-7(2)に画像信号のコンター分布を示す。シート光と比べて光の拡散幅は狭く、光路減衰も大きい。図-9に散乱減衰分布を示す。 $L \geq 50\text{mm}$ で散乱減衰を生じた。シート光と同じ光路域で式(6)の係数を算定すると濁度は0.0031[1/m]、多重散乱による再生因子は0.646であった。ビーム光はシート光に比べて、単位長さ当たりの散乱光量が24%大きいので画像信号の光路減衰は大きかった。逆に多重散乱の再生光量は17%少ないので、画像信号値の大きさはシート光に比べて全体的に約0.18低下した。

(3) 散乱減衰と換気回数との関係

換気回数は次のように求めた。回帰直線の算定範囲を、始点として撮影開始直後に生ずる画像信号値の飽和平衡状態を除くために画像信号最大値 $I_{\max}$ の90%となる点を選び、終点は画像信号の最小値として、その間で回帰直線を最小自乗法により算定し、その傾きより換気回数を求めた。図-10に画像信号の減衰分布とバックグラウンドの画像信号値 I_0 を差し引いた分布を示す。バックグラウンドの画像信号値は0.008。照明はレーザシート光。図-11に換気回数と室容積濃度比との関係を示す。解析点は図-4のNo.1とその180mm真下のNo.2。光路長により解析点のNo.2の画像信号値はNo.1の点に比べて低下するが、光の散乱減衰と室容積濃度比は換気回数の測定精度に影響しなかった。これは、レーザ光の散乱減衰による画像信号値の大きさの低下よりも減衰分布の傾きが換気回数の算定に重要に作用するためと考えられる。

4.3 画像濃度減衰法の測定精度に関する検討

(1) レーザ光出力の影響について

図-11 散乱減衰と換気回数との関係

図-12 レーザ光出力と画像信号最大値の関係

図-13 レーザ光出力と換気回数との関係

図-14 光の散乱

図-15 トレーサミストの粒径頻度分布

図-16 オゾンナミストとスモークミストの画像信号減衰分布

鮮明な濃淡画像を得るためには、光エネルギーを上げて光学的濃度を高くする必要がある。アルゴンイオンレーザの出力を0.25Wから5Wまで変えて換気回数の測定精度に及ぼすレーザ光出力の影響を調べた。トレーサはオンジナミスト、軒高風速は1.0m/sとした。図-12に画像信号最大値 $I_{\max}$ とレーザ光出力 E の関係を示す。画像信号と対象面照度は式(5)に示す比例関係があるので、飽和状態に近い $I_{\max}$ を生じた区間を除いた0.25~3Wの間で最小自乗法により回帰係数を計算した。画像信号最大値とレーザ光出力の間に $I_{\max} \sim E^{0.666}$ の関係があった。なお、アルゴンイオンレーザ4Wの光束は950mに相当する¹⁴⁾。図-13にレーザ光出力と換気回数の関係を示す。レーザ光出力0.25Wのとき $I_{\max}$ が0.2以下に低下したので、換気回数の回帰誤差は大きくなり、3Wattの換気回数と比べて偏差が約60%生じた。

(2) トレーサミスト粒径の影響について

図-14に示す球形粒子に入射する光の散乱は、入射光強度と散乱光強度の間に、懸濁粒子による光の吸収を無視すれば、

$$i = i_0 \cdot R(\theta) \cdot C/r^2 \quad (7)$$

$$R(\theta) \sim \delta^6 / \lambda^4 \cdot f(\theta) \quad (8)$$

ここで i : 方向 θ の距離 r の散乱光強度、 i_0 : 入射光強度

$R(\theta)$: レイリー比、 C : 粒子濃度、 δ : トレーサ粒子径

λ : 光の波長、 $f(\theta)$: 散乱光強度の方向依存性を表す関数

が成り立つ^{12,15)}。散乱光強度は粒径の自乗に比例するので、大きな粒径は光学的濃度を高くすることができる¹⁶⁾。図-15に粒径の異なるオンジナミストとスモークミストの粒径分布を示す。相対頻度により粒径の大きさを比較すると、オンジナミストに比べてスモークミストの粒径は小さく、最大頻度は $0.25\mu\text{m}$ で生じた。目視でも模型内に排出されたスモークミストの粒径はかなり細かく、また密に分布したが、光の反射量は少なかった。図-16に画像信号の減衰分布を示す。軒高風速は1.0m/s。ミスト粒径はレーザ光の波長に比べてかなり大きかったので、式(7)の形で散乱光を評価できないが、粒径の小さなスモークミストはオンジナミストよりも低い画像信号値を示した。しかし、両者はほぼ一定の傾きで減衰した。図-17に両者の換気回数の比較を示す。室容積濃度比は一定で軒高風速を変化させた。オンジナミストとスモークミストの間に測定精度の差はなく、軒高風速によらずほぼ同じ換気回数を得られた。オンジナミストは可視化トレーサとして広く使用されているが、加熱温度レベルによってかなりの刺激臭を生じるので、実測に適した芳香臭のトレーサミストであるスモークミストの適用性を検討した。今回の測定により、オンジナミストよりも小さな粒径であるスモークミストは、オンジナミストと同程度の換気回数の測定精度を得ることができると判った。

(3) 軒高風速の影響について

軒高風速を0.25m/sから2.5m/sまで変化させて、換気回数と軒高風速の関係を調べた。トレーサはオンジナミスト。図-18に結果を示す。一般に換気回数は軒高風速に比例するが、画像濃度減衰法で得られる換気回数も軒高風速に比例することを確認した。

(4) ガス濃度減衰法とビデオ画像濃度減衰法の比較について

図-19に軒高風速0.25、1.0、2.0m/sのガス濃度減衰分布を示す。濃度分析計の高い応答性のためにガス濃度は低濃度で激しく変動し、零レベルに近い値が検出されたので、背景濃度を $C_0 = 1 \times 10^{-5}$ として、測定濃度のバックグラウンド処理を行った。図-20に

図-17 オンジナミストの換気回数とスモークミストの換気回数との関係

図-18 軒高風速とオンジナミストの換気回数との関係

図-19 ガス濃度の減衰分布

図-20 オンジナミストの換気回数とガス濃度の換気回数との関係

オンジナミストの画像濃度減衰法による換気回数とガス濃度減衰法による換気回数の比較を示す。回帰式は

$$N_g = 0.91 \cdot N_o \quad (9)$$

であった。ビデオ画像の濃度減衰法はガス濃度減衰法と比べて9%の誤差で換気回数を測定できることが判った。

5. 結語

本論文では、汎用のビデオカメラを用いてビデオ画像信号の減衰曲線から換気回数を測定するビデオ画像濃度減衰法を提案し、

その有効性を風洞模型実験で検討した。本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

(1) ビデオカメラのペデスタルを調整することにより、画像信号と視感反射率の間に良い相関関係を形成できた。

(2) レーザシート光は、レーザビーム光に比べて多重散乱による光量の再生寄与が大きく、画像信号の光路減衰は小さかった。

(3) 2次元通風模型では、光の散乱減衰が換気回数の測定精度に及ぼす影響は小さかった。

(4) トレーサとしてオンジナミストを用いた場合、画像信号最大値はレーザ光出力のべき乗に比例し、0.5Watt以上のレーザ光出力が得られれば、換気回数の測定精度に及ぼすレーザ光出力の影響は小さかった。

(5) 粒径 $0.25\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ のトレーサミストが換気回数の測定精度に及ぼす影響は小さかった。

(6) 軒高風速 2.5m/s 以下の範囲内で、本測定法はガス濃度減衰法と比較して誤差9%の測定精度で換気回数を測定できた。

謝辞 ビデオカメラの校正に関して本学芸術学部映像学科長谷川伸教授から適切なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

<主な記号>

C: ガス濃度	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
I: 画像信号値	
I ₀ : 背景画像信号値	
N: 換気回数	$[\text{回}/\text{s}]$
A: 無彩色明度標準色票のマンセル明度指数	
R: 視感反射率	
U ₀ : 模型軒高の風速	$[\text{m}/\text{s}]$
L: 光路長	$[\text{m}]$
τ : 濁度	$[\text{l}/\text{m}]$
C _v : 室容積濃度比	
E: レーザ光出力	$[\text{Watt}]$
F: 相対頻度	
t: 時間	$[\text{sec}]$

添字

g: ガス
o: オンジナミスト
s: スモークミスト

参考文献

- 1) JISハンドブック、屋内換気量測方法(炭酸ガス法)、A1406-1974、日本規格協会
- 2) 大場、ビデオ画像による室内通風模型の換気回数の測定法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、573-574、1996
- 3) 入江、大場、ビデオ画像による室内通風模型の換気回数の測定法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、605-606、1997
- 4) 大場、ビデオ画像による室内換気回数の測定方法に関する研究、可視化情報学会誌、Vol.16, Suppl No.1, 135-138, 1996
- 5) 入江、大場、ビデオ画像輝度値減衰法による室内通風模型の換気回数測定精度に及ぼす実験条件の影響について、可視化情報学会誌、Vol.17, Suppl No.1, 175-178, 1997
- 6) 建築環境工学実験用教材 I 環境測定演習編、日本建築学会、60-67, 1982
- 7) 大場、環境風洞におけるビデオ画像計測手法の開発研究 その1 汚染物質拡散の測定について、日本建築学会計画系論文集、418, 11-19, 1990
- 8) 大場、環境風洞におけるビデオ画像計測手法の開発研究 その2 濃度変動量の測定方法について、日本建築学会計画系論文集、481, 61-66, 3. 1996
- 9) 尾崎、谷内、画像処理 その基礎から応用まで、共立出版、1988
- 10) 木内、画像入力技術ハンドブック、日刊工業新聞社、1992
- 11) 直川、入門カラーテレビ、東京電機大学出版局、1992
- 12) 加賀、井上、山口、画像処理を用いた換気室模型内の三次元濃度計測、空気調和・衛生工学会論文集、55, 25-33, 1994
- 13) 高橋、基礎エアロゾル工学、養賢堂、1982
- 14) 安藤、可視化撮影における照明光源(2)、可視化情報、17, 64, 28-34, 1997
- 15) 関、コロイド科学の基礎、化学同人、1992
- 16) 近藤、やさしいコロイドと界面の科学、三共出版、1989

(1997年9月8日原稿受理、1997年11月14日採用決定)